

「超音波ドプラ診断法の発展 ー連続波ドプラ法と パルス・ドプラ法」

国立循環器病センター 仁村 泰治

●はじめに

超音波ドプラ診断法は昭和30年(1955)代のはじめ、超音波のドプラ周波数偏移を利用して対象の運動速度を測るという工学原理の診断学的应用を目指す大阪大学産業科学研究所と医学部との学際研究として生まれたものである。その過程で、まず初めての心臓超音波情報として弁開閉のドプラ信号が非侵襲的に見出され、ついで血流からのドプラ効果による血流計測の概念が生まれた¹⁾。さらに、これから少し遅れて米国のRushmer研究室で自然の状態における循環器の様子を調べる目的で、植込み型振動子を用いたテレメータ方式のドプラ血流計測装置が開発されている。

上述のようなドプラ診断法の創始期についてはすでに別稿²⁾で述べたので、ここではドプラ診断法が実用期に入った昭和40年代、50年代の流れについて述べる。

●実用期に入ったドプラ診断法

1) 末梢循環領域

おおむね昭和40年(1965)ごろ

からドプラ血流計測が次第に实际应用に入ってきた。金子らは創

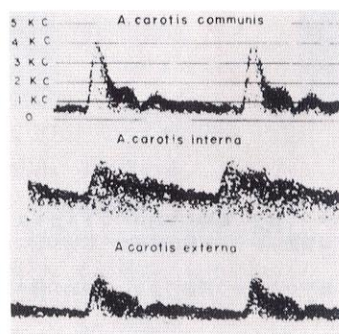


図1：頸動脈の血流パターン

左列：若年者(21歳、女)、右列：高齢者(70歳、男)

各列上：総頸動脈、中：内頸動脈、下：外頸動脈

若年者、高齢者における代表的波形である。若年者では総頸動脈波形の振動性が強く、また内頸動脈では拡張期も流れが速く、連続性の強い波形である。高齢者では総頸動脈の振動性が減少し、また内頸動脈の拡張期の流速は低下し、断続性傾向のパターンになっている。(金子、白石氏寄贈)

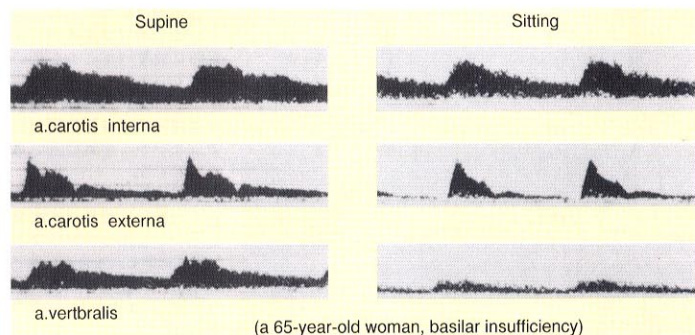


図2：いわゆるbasilar insufficiency症例における体位の頭部血流への影響

仰臥位に比べて坐位では椎骨動脈流速の低下が著しい。(金子、白石氏寄贈)

始期のドプラ血流計測の開発³⁾に引き続いて主として脳循環方面にドプラ法を用いて多くの臨床知見を集積し、従来の手段では得られなかった現象を見出すなど⁴⁾、脳循環の領域ではドプラ血流計測は早くから注目されていた(図1)。それゆえ技術的にもいろいろのvariationが試みられており、例えば古幡、吉村⁵⁾らのようにエコー法で頸動脈の血管径の拍動を追跡し、他方ドプラ法によってその流速を計測し、両者から瞬時血流量を連続的、かつリアル・タイムに求める装置を考察し、これは国際的

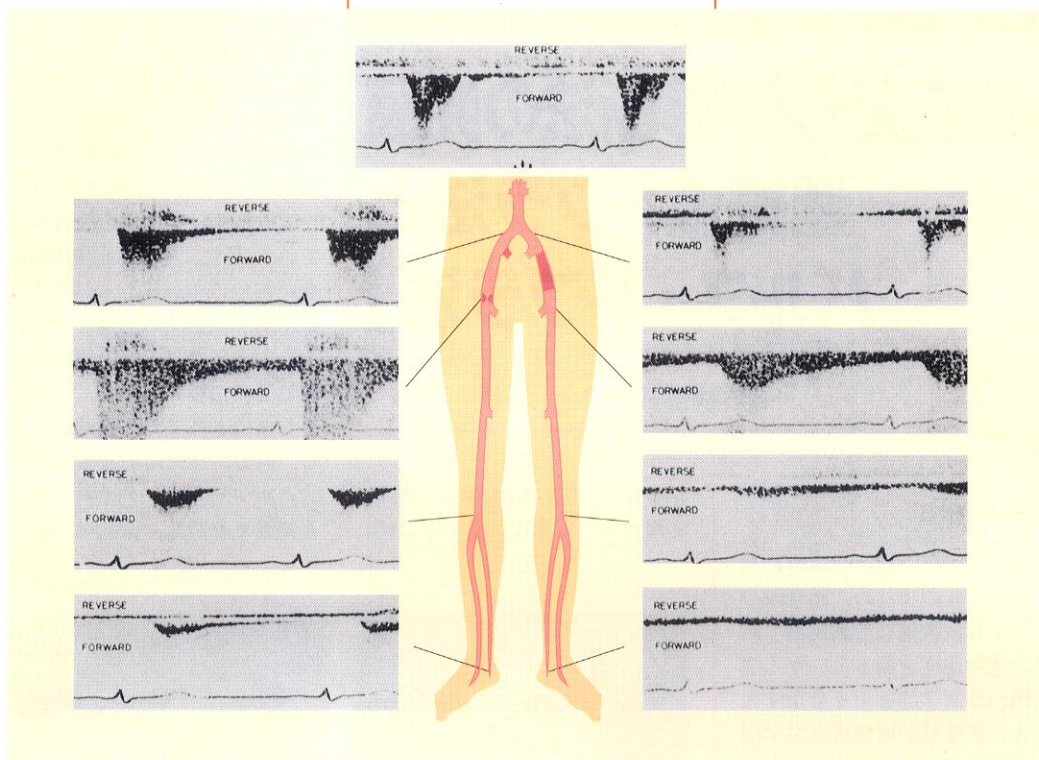


図3：左腸骨動脈閉塞，右股動脈狭窄症例

右股動脈狭窄部では流速は著しく速く，かつパターンは全く経時的な線スペクトル性を失って，流れの乱れが示されている．その中枢側の腸骨動脈では流速は遅く，かつこのレベルでは普通にみられる駆出末期から拡張初期にかけての逆流相はなくなり，流れは断続的になっている．狭窄より末期側も断続的である．

左腸骨動脈閉塞部より下流の股動脈では速度の緩やかな，かつ抑揚の少ない連続的の緩やかなパターンである．この緩やかな流れは副血路によるものと思われる．

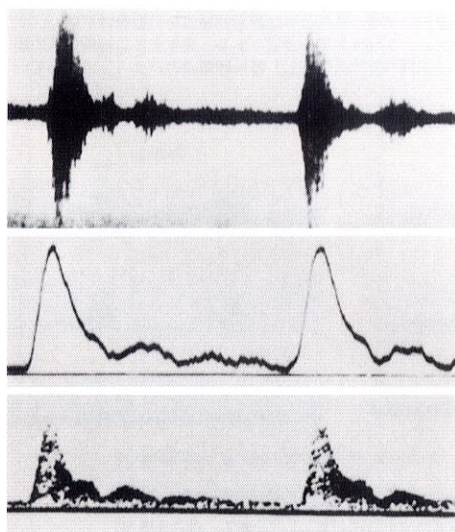


図4：血流ドブラ記録，表示方式

上：周波数判別方式による電磁オシロ表示．出力が周波数に比例するので，その包絡線は以下のものに似てくる．ドブラ法研究の発足時にはすべてこれが用いられていた．

中：O-cross counter．表示値は理論的には平均周波数ではないが，それに近い値を表示する．

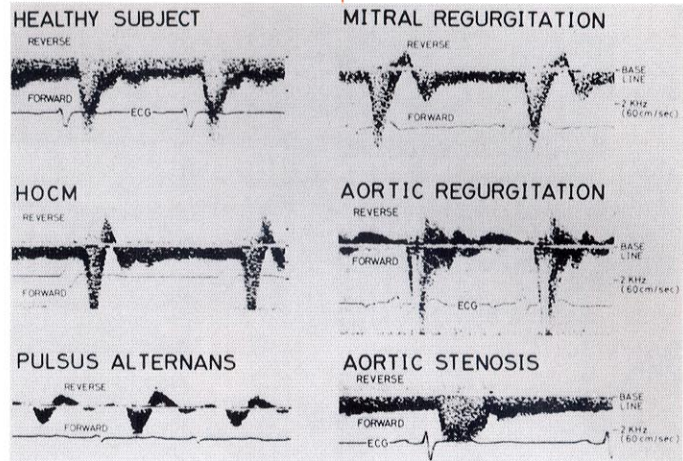
下：周波数スペクトログラム．包絡線は最高流速成分を示す．初期はヘテロダイン方式によるoff-lineのものであったが，現在は高速フーリエ解析によるon-lineのものである．

にも注目された．またDoppler angiographyというのはドブラ探触子で体表面を走査して，ドブラ血流信号が検出された部位に対応して血管の走行をブラウン管面の光点の帯として画くもので，血管に狭窄があればその部分が欠損像となるものである⁵⁶⁾．欧米には頸動脈の血栓，狭窄の多いことからこの方法はかなり用いられたようである．

また一般の末梢血管の方も当初から指向されている⁷⁾．末梢血管の血流状況は計測局所の狭窄などの変化にもよるが，その上流，下流の血管の状況，血管

図5：各種の心臓の駆出形式異常例における
総頸動脈血流パターン

この図では前進流を基線より下向きに、逆流成分を上向きに表示されている。このことは特に意味はない。



抵抗、心臓の拍出状況、静脈の還流状況などにも関係がある(図2, 3)。

なお、ドプラ診断法の開発当時は血流ドプラ出力の表示には周波数弁別器を通して電磁オシロが用いられていたが(図4)、その後は一般にO-cross counterがよく用いられた。その表示値は平均流速に近い(実際に経験される流速分布の範囲内での誤差は20%以内とみられている⁸⁾)。しかし、O-cross counterは音場内に順逆両方向の流れが混在するときはそのそれぞれを判別できず、表示されるのはその和であるという欠点もある。筆者ら¹⁾は早くからスペクトログラムを用い、欧米⁹⁾でも一部で使用されていた。当時用いられたのはBell社のheterodyne方式によるオフラインのものである。スペクトログラムには電子印刷の階調特性の問題もあり、その包絡線は最高流速成分の時間的変遷であり、平均流速はわからない。しかし人の眼のパターン認識能力は二次元の視覚パターンに対しては有力であるので、スペクトログラムは臨床上実際にみら

れる現象に対しては有利な点が多い。それゆえ、その後高速フーリエ解析を行い、ライン・スキャンレコーダを用いるリアル・タイムのスペクトログラムが実現してからはほとんどこれが用いられている。

2) 心臓領域

超音波ドプラ診断法の開発の当初、まず最初に見出されたのは弁ドプラ信号であり、これは特に心拍の時相分析に有利であった¹⁾。引き続き心筋傷害例などで、駆出前期や等容性弛緩期の異常など、現在の心室収縮不全、拡張不全の概念に先駆する知見¹⁰⁾、その他を得た。しかし、一般の関心はほぼ同時に発展してきた、より具象的なMモード心エコー法に向いたので、弁ドプラはあまり試みられなかった。

上述のように末梢の血流状況には心臓の拍出、心臓への還流の状況も関係するので、心疾患でも末梢の血流波形には種々の変化がみられる(図5)。しかし、当時のドプラ法は超音波連続波を用いており、複雑と考えられる心腔内血流を分析することは

困難と予想されるので、その解決のためには早くからドプラ情報をサンプル部位ごとに分けて収集することができるパルス・ドプラ法など、変調ドプラ法の開発が望まれていた。

このような中で、Kalmanson(仏)¹¹⁾らは、1968年(昭和43)ドプラ血流計測で、心臓からの拍出および静脈還流を詳細に分析し、翌年からはさらにドプラ・カテーテルを用いて心腔内の血流を調べていることは注目に値する¹²⁾。少し遅れてBenchimol¹³⁾らもドプラ・カテーテルで心腔内血流の分析を行った。いずれにしてもこれらの試みは超音波法の特徴である“non-invasive”から離れて、現在の体腔内超音波に先駆する新しい診断思想として重要である。その後ドプラ・カテーテル法は昭和50年代にはほとんど行われなかった。しかし60年代に至ってドプラ・カテーテルやドプラ・ガイドワイヤが盛んに試みられるようになった。いうまでもなく、冠状動脈のインターベンションの発達によって改めて実用的必要度が高まったためであり、このように



図6：胎児ドブラ

DCG：ドブラ信号，PCG：胎児心音図，ECG：心電図，M：母体心電図，F：胎児心電図

いわゆる胎児ドブラは成人のfundamental cardiac Doppler¹⁾にあたるもので、その出力の大部分は心臓壁の動きによるものである。本例は胎生10ヵ月であるので、心臓も成人の場合と同じであり、このデータにおいてもfilterを用い、かつ感度を上げれば弁ドブラを分離することができる。(竹村 晃氏寄贈)

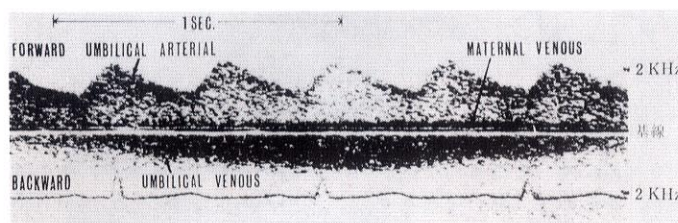


図7：いわゆる胎盤ドブラ

臍帯血管の胎盤出入部近くで記録。上向きの大い規則正しい波は臍帯動脈血流、下向きの大い波は臍帯静脈、上向きに緩やかな低速の流れは母体側静脈。(竹村 晃氏寄贈)

学術、技法の発展も周辺の事情に大きく影響されることがわかる。

3)産科領域

妊娠早期診断のための胎児ドブラ (fetal Doppler) の有用性は早くからCallagen, Johnsonらに指摘され¹⁾、広く用いられている(図6)。これは胎児心臓全体からのドブラ出力を含んでいると考えられ、妊娠後期には弁ドブラなどもそれから濾波器を用いて抽出することができる。また胎児血流、胎盤血流なども研究され、これらの方面はその後発展して現在周産期ドブラ (perinatal Doppler) として独自の分野を形成している(図7)。

●パルス・ドブラ法の発達ードブラ心エコー法

上に述べたように変調ドブラ法の出現は早くから望まれてい

たが、すでに1967年(昭和42)ごろからSeattleグループでReid¹⁴⁾の指導下にBaker¹⁵⁾らが送信超音波をパルス波にするパルス・ドブラ法の考案をしていた。またこれとは独立に1969年(昭和44)にWells(英)¹⁶⁾、Peronneau(仏)¹⁷⁾がパルス・ドブラ法を開発し、また同じような目的で奥島¹⁸⁾らはM系列変調ドブラ法を提案した。これらの新技術は当初は主に血管内血流の流速プロフィールを求めることを目的としていたが、実際には心腔内血流分析の方に大きく展開しはじめた^{19,20)}(図8)。これらの新技術に対して、従来の連続波を用いるものは連続波ドブラ法 (continuous wave Doppler technique, CW-Doppler technique) と呼ばれている。

変調ドブラ法を心臓内や深部血管に対して用いる際には必然的にサンプル部位の位置モニタ

ーのためにエコー法との結合が必要になる。これには従来の接触複合走査方式あるいはMモードとの結合、いわゆるDuplex scanner²¹⁾、さらにたまたま並行して発展してきたリアル・タイム二次元心エコー法との2探触子式の結合^{22,23)}(図9)などの中間的なものを経たのち、現在のような、phased array二次元心エコー法との、単一探触子による同時施行方式での複合が行われるようになった²⁴⁾。それとともにドブラ出力の表示も上述のような高速フーリエ解析によるリアル・タイムのスペクトログラムが用いられ、施行が著しく機能的になった。およそこのような型の装置を中心にドブラ法とエコー法との複合はドブラ心エコー法 (Doppler echocardiography*) と呼ばれるようになった。また上記の型の装置は昭和50年代の

*: Doppler echocardiographyという言葉はすでにJohnson²⁰⁾らによって用いられている。

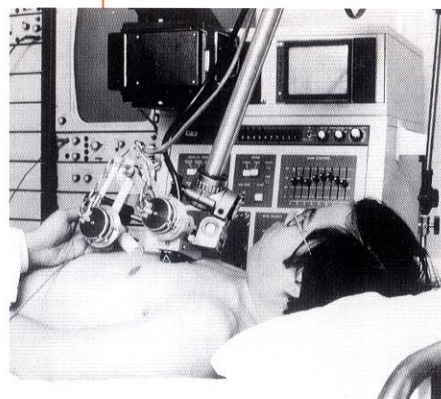
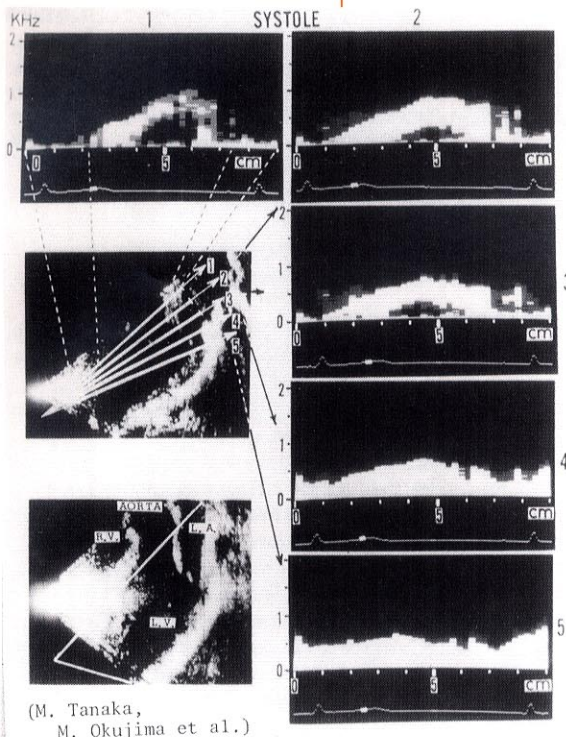


図9：二探触子型ドブラ心エコー法用探触子

Phased array用探触子（図中の黒いもの）とドブラ用探触子（白）とはポテンシオメータで結ばれており、両者それぞれの位置関係とブラウン管上のエコー像とドブラ用ビームとの間の関係とが調整される。扇形画像の斜め横からドブラ用ビームが投入される。（日立メディコ試作）

◀ 図8：M系変調ドブラ法による左室内流速プロフィール

左下段のごとくドブラ法は心拍同期断層像に重畳使用されている。左中段の1～5各ビーム方向の太線部分の流速プロフィールが得られている。（田中元直氏寄贈）

半ば以降心臓超音波のルーチンとしては標準的なものになり、またドブラ法なる言葉も主としてドブラ血流計測の意味に取られるようになった。

一般に心疾患の肉眼レベルでの病態生理を論じるには心内構造物の形態、動態の状況とそれに即して内腔の血流分布、流速変化とを併せて考えねばならない。上記の新しい形式の意義はそのことを臨牀的に取り扱えるようにしたことである。しかし、この方式でも構造物と問題血流との関係を厳密に知るには限界があり、また手技やデータ保管なども繁雑で、なお過渡期的な感を免れなかった。そのようなわけで、やがて昭和60年代には発達してきたカラー・ドブラ法

にルーチンとしての主座を譲ることになった。

●心臓超音波と血行動態との結び付き および連続波ドブラ法の再認識

昭和50年代に現れた心臓ドブラ診断についての他の進歩はドブラ法と心腔内血行動態数値とを直接結びつける途が開かれたことと、心腔内血流の計測には事実上連続波ドブラ法でも可能な場合のあることが認識されたことである。

一般に心腔内の血液を粘性のない、非圧縮性流体とみて、かつ他の微小項を省略するとし、流れの中の場所(1)の圧、流速をそれぞれ P_1 、 v_1 、場所(2)のそれを P_2 、 v_2 とすると、これらの間

にはベルヌイ (Bernoulli) の式が知られている。

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

ここで ρ は液の密度である。ここで使用単位を $P(\text{mmHg})$ 、 $v(\text{m/sec})$ とすると、近似的に、

$$P_1 - P_2 = 4(v_2^2 - v_1^2)$$

さらにここで逆流ジェットや狭窄流のように P_1 に対して P_2 を、 v_2 に対して v_1 をそれぞれ無視してもよいような条件であれば、

$$P = 4v^2$$

が得られる(図10)。この式は簡易ベルヌイ式と呼ばれており、この関係は逆流ジェット、狭窄流など、心内血流についてはおおむね妥当なことが認められており、超音波と心内圧とがはじめに結びつけられることになった^{25,26)}。

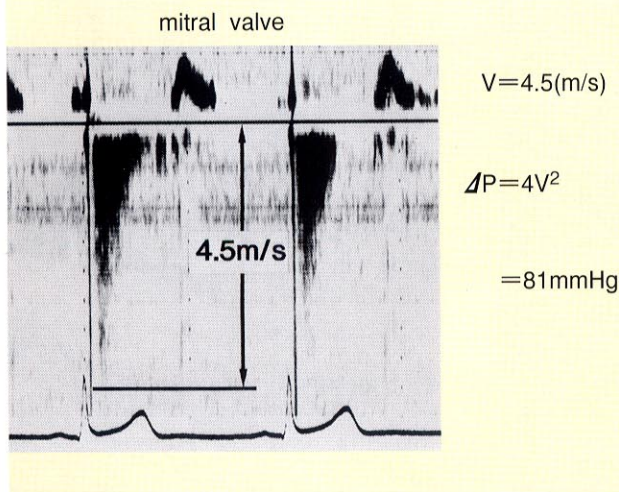


図10：簡易ベルヌイ式による心腔内での圧較差算出

本図は僧帽弁逆流の逆流圧の算出。一般にドブラ波形を連続的にモニターして探索すれば必ずしも二次元エコー像によらずともドブラ用ビームを対象の流れの方向に一致させられる場合も多い。しかし、解剖学的条件などのためにドブラ用ビームを流れの方向に一致させられないこともあり、このような場合は二次元エコー上で流れとビームの夹角を測ることが必要になる。

さらに流体の連続方程式や pressure half-timeなども導入してドブラ計測から血管狭窄度、弁口面積などの概算など、成果を豊富にされている²⁷⁾。

なお、このような心臓内血流の計測に際して、例えば逆流ジェットや狭窄流のような流れは一般の心内血流の中で通常際立って高速であり、かつ所在もおおむね予想できるので、特に最高流速成分、すなわちスペクトログラムの包絡線のみを求めるのであれば、必ずしもパルス・ドブラ法でなく、簡単な連続波ドブラ法装置だけでもよい場合もあるのではないかと考えることができる。その方が総合的な検出度もよい。もちろんこのような考えの背景にはドブラ心エコー法によって心内構造物や血流の状況がかなりよく知られてきたことがあり、また高速フーリエ解析とライン・スキャンレコーダによりリアル・タイムにドブラ波形をモニターしながら

心腔内を探索できるようになったことも重要な条件になっている。

●むすび

昭和40年代には超音波ドブラ診断法は末梢血管の血流状況を知るためにはかなり実用されていたが、心臓領域ではまだあまり用いられてはいなかった。しかし、パルス・ドブラ法が現れ、それがリアル・タイム二次元心エコー法と複合化されると、それで心内構造物と血流状況とを総合的に観察できるようになった。それゆえ、昭和50年代の半ばにはリアル・タイム二次元心エコー装置には複合的にパルス・ドブラ機能を備えることが普通になり、この技法がドブラ心エコー法(Doppler echocardiography)と呼ばれ、また慣習上単に心エコー法というだけでドブラ機能も併せて考えるようになった。

また、この昭和50年代にベルヌイの式を中心として超音波診

断法と血行動態が結びつけられたことも意義が深い。これによって非侵襲的に血行動態数値の獲得を可能にするという新しい分野が開かれたものといえる。

さらに、これらの進歩とともに心内血流の測定の際、ある範囲内ではパルス・ドブラ法を用いなくても連続波ドブラ法で、かつ二次元エコーのモニターなしに行うことも可能であることが明らかになった。このことにはレコーダが発達して、リアル・タイムにドブラ波形をモニターして心腔内を広く探索できるようになったことが大きい要因である。

しかし、上のようなドブラ心エコー法も性能の上でなお理想的とはいえず、また操作も繁雑で、なお過渡期的なものであり、やがて昭和60年(1985)から発達してきたカラー・ドブラ法に主流の座を譲ることになった。

●文献

- 1) 仁村泰治：心エコーの歴史「超音波ドブラ診断法の最初の10年」．心エコー 2000；1：200-204
- 2) Satomura S, Kaneko Z : Ultrasonic blood rheograph. in Proceedings of the Third International Conference on Medical Electronics, 1960 ; pp254-258
- 3) 金子仁郎, 白石純三編：超音波血流検査法, 開発の歴史と脳循環測定, 永井書店, 大阪, 1987
- 4) 古幡 博, 菅野亮一, 古平国泰, 青柳 徹, 藤代健太郎, 林 純, 松木博治, 吉村正蔵：超音波血流量測定装置の開発．医用電子と生体工学 1978；16：特別号 344
- 5) Hokanson DE, Mozersky D, Sumner DS, Strandness DE Jr : Ultrasonic arteriography : a new approach to arterial visualization. Biomed Engng 1971 ; 6 : 420
- 6) Reid JM, Spencer MP : Ultrasonic Doppler technique for imaging blood vessels. Science 1972 ; 176 : 1235-1236
- 7) Rushmer RF, Baker DW, Stegall HF : Transcutaneous Doppler flow detection as a nondestructive technique. J Appl Physiol 1966 ; 21 : 554-556
- 8) 中山 淑, 古幡 博：超音波法, 沖野, 堀, 本田編, 血流測定, 医学書院, 東京, 1974 ; pp128-141
- 9) Strandness DE Jr, Schultz RD, Sumner DS, Rushmer RF : Ultrasonic flow detection A useful technic in the evaluation of peripheral vascular disease. Am J Surg 1967 ; 113 : 311-320
- 10) Nimura Y, Matsuo H, Mochizuki S, Aoki K, Wada O, Abe H : Analysis of a cardiac cycle of the left side of the heart in cases of left ventricular overloading or damage with the ultrasonic Doppler method. Am Heart J 1968 ; 75 : 49-65
- 11) Kalmanson D, Toutain G, Veyrat C, Chiche P : Enregistrement . transcutané du flux artériel et veineux par fluxmètre directionnel à effet doppler. Rapport préliminaire (1). Arch Mal Coeur 1968 ; 61 : 291-292
- 12) Kalmanson D, Toutain G, Novikov N, Derai C : Cathétérisme vélocimétrique rétrograde des cavités cardiaques gauches par sonde ultrasonique directionnelle à tête orientable. Description d'un appareillage et premiers résultats chez le chien. Arch Mal Coeur 1970 ; 63 : 142-143
- 13) Benchimol A, Stegall HF, Garlran JL, Barreto EC, Goldstein MR, Sandoval J : Right atrium and superior vena cava flow velocity in man measured with the Doppler-catheter flowmeter-telemetry system. Am J Med 1970 ; 48 : 303-308
- 14) Reid JM : Development of medical ultrasonics in ULTRASOUND '82 ed by Lerski RA, Morley P, Pergamon Press, Oxford, 1983 ; pp3-12
- 15) Baker D : Pulsed ultrasonic Doppler blood-flow sensing. IEEE Trans Son Ultrason 1970 ; SU-17 : 170-185
- 16) Wells, PNT : A range-gated ultrasonic Doppler system. Med biol Engng 1969 ; 7 : 641-652
- 17) Peronneau P, Deloche A, Bui-Mong-Hung, Hinglais J : Débitmétrie ultrasonore—Développements et applications expérimentales. Europ surg Res 1969 ; 1 : 147-156
- 18) 奥島基良, 大槻茂雄：速度分布を測定するためのM系列変調ドップラー速度計．日本超音波医学会研究発表会講演論文集 1970；18：49-50
- 19) 田中元直, 香坂茂美, 岡 捨己, 奥島基良, 大槻茂雄, 寺沢良夫, 海野金次郎, 仁田桂子, 柏木 誠, 海老名敏明：超音波心臓層法とM系列変調ドブラ法との併用法—超音波心臓断層法 第20報—日本超音波医学会研究発表会講演論文集 1971；19：41-42
- 20) Johnson SL, Baker DW, Lute RA, Dodge HT : Doppler echocardiography. The localization of murmurs. Circulation 1973 ; 48 : 810-822
- 21) Barber FE, Baker DW, Nation AWC, Strandness DE, Reid JM : Ultrasonic Duplex Echo-Doppler Sanner. IEEE Trans Biomed Engng 1974 ; 21 : 109-113
- 22) Griffith JM, Henry W : An Ultrasound system for combined cardiac imaging and Doppler blood flow measurement in man. Circulation 1978 ; 57 : 925-930
- 23) 小川俊雄, 片倉景義, 近藤敏郎：電子走査形超音波断層装置 (5), 断層像/ドブラ複合装置．日本超音波医学会研究発表会講演論文集 1977；31：183-184
- 24) 瀬尾育式, 小松研一, 飯沼一浩, 佐藤 茂：セクター電子走査法による実時間断層像とドブラ信号の同時表示．日本超音波医学会研究発表会講演論文集 1979；35：91-92
- 25) Holen J, Aaslid R, Landmark K, Simonsen S : Determination of pressure gradient in mitral stenosis with a non-invasive ultrasound Doppler technique. Acta med Scand 1976 ; 199 : 455-460
- 26) Hatle L, Brubakk A, Tromsdal A, Angelsen B : Noninvasive assessment of pressure drop in mitral stenosis by Doppler ultrasound. Brit Heart J 1978 ; 40 : 131-140
- 27) Hatle L, Angelsen B, Tromsdal A : Noninvasive assessment of atrioventricular pressure half-time by Doppler ultrasound. Circulation 1979 ; 60 : 1096-1104